

GLETSCHER UND GLETSCHERSCHWUND IM MATTERTAL (SÜDLICHE WALLISER ALPEN, VS)

par Bernhard Denneler¹ et Max Maisch²

RÉSUMÉ

Glaciers et retrait glaciaire dans la vallée de Zermatt (Alpes valaisanne du sud)

Dans le cadre d'une partie d'un projet du Programme National de Recherche 31 («Changements climatiques et Catastrophes naturelles»), une reconstruction complète de l'étendue glaciaire lors de son apogée en 1850 a été entreprise dans la région de la Vallée de Zermatt (Valais), puis comparé avec l'étendue actuelle telle qu'elle est documentée dans l'Inventaire des Glaciers Suisses de l'EPF Zurich (année de référence 1973). Depuis 1850, la surface glaciaire a régressé de 200,6 km² à 167,2 km², soit une réduction de 33,4 km² (16,7%). Cette réduction régionale inférieure à la moyenne suisse, par exemple celle des Grisons est de 40 %, s'explique bien par les facteurs «taille des glaciers» et «degré d'englacement». Le pourcentage de réduction est inversement proportionnel à la taille des surfaces englacées de 1850: les petits glaciers montent les réductions de taille les plus fortes.

La ligne moyenne d'équilibres, ou ligne de névé des glaciers, est déterminée uniformément par la méthode de division des surfaces des glaciers en zone d'accumulation Sc et zone d'ablation Sa (rapport constant Sc:Sa = 2:1). Cette ligne se situe pour toute la région à 3085 m d'altitude, c'est à dire une des limites les plus élevées des Alpes Suisses. Géographiquement et climatologiquement, pour les deux années de référence considérées, les lignes de névé tendent à remonter en altitude depuis le Valais occidental plus humide (Tour Sallière, Aiguille d'Argentière) vers la région plus sèche de la Dent Blanche et du Mont Rose, pour s'abaisser sensiblement en allant plus loin vers l'est (Monte Leone, Blinnenhorn). Cette tendance est due principalement aux différences de précipitations agissant sur le facteur d'accumulation.

La modélisation progressive de plusieurs scénarios de remontée de la ligne de névé et de leurs impacts sur la glaciation actuelle, permet de prévoir que même les plus grands glaciers de la Vallée de Zermatt vont reculer davantage dans les prochaines décennies, que lors de toute la période de régression considérée (1850-1973). Cette estimation glaciologique contribue à souligner la sensibilité accrue de l'environnement glaciaire et périglaciaire de haute montagne, aux pronostics de changements climatiques.

¹ Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich.

² Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich.

EINLEITUNG

Die Frage, wie schnell und nach welchen Gesetzmässigkeiten die Alpengletscher auf die künftige Entwicklung des «Treibhausklimas» reagieren werden, ist nicht nur für die glaziologische Forschung von grosser Bedeutung (vgl. VAW, 1990; HAEBERLI, 1990, 1991, 1992; KUHN, 1990; PATZELT und AELLEN, 1990; HÖLZLE, 1994; MAISCH, 1992, 1995). Auch für die Wahrung touristischer (z.B. Sommerskitourismus, vgl. ABEGG et al., 1994) und wasser-wirtschaftlicher Interessen spielt sie eine zentrale Rolle. Ihre möglichst präzise und differenzierte Beantwortung bildet Leitthema und Richtziel eines am Geographischen Institut der Universität Zürich ausgeführten Teilprojektes des Nationalen Forschungsprogrammes 31 (NFP 31) zum Problemkreis «Klimaänderungen und Naturkatastrophen». Unter dem Titel «Die Auswirkung von Klimaänderungen auf die Gletscher und deren Vorfelder – Gletscherschwund-Szenarien» werden drei gletschergeschichtlich relevante Zeiträume systematisch bearbeitet und vergleichend ausgewertet: Die Hochstandsausdehnung von 1850 (Zeitfenster «Vergangenheit»), die aktuelle Vergletscherungssituation (bzw. Bezugsjahr 1973, Zeitfenster «Gegenwart») sowie die zukünftige Entwicklung im Rahmen verschiedener Klima-Szenarien (21. Jahrhundert, Zeitfenster «Zukunft»). In dieser überregional angelegten und auf Vollständigkeit abzielenden Studie mit Inventarcharakter werden etappenweise sämtliche Gletscher der Schweizer Alpen erfasst und mit den wichtigsten Parametern in einer Gletscher-Datenbank abgespeichert.

Das Untersuchungsgebiet «Schweizer Alpen» wurde und wird gegenwärtig von verschiedenen Autoren individuell, aber nach einheitlichen Richtlinien systematisch bearbeitet (Inventarregion «Bündnerland»: MAISCH, 1992; Inventarregion «Gotthard»: BATTAGLIA, 1994; Inventarregion «Unterwallis»: BENZ, 1995; Inventarregion «Berner und nördliche Walliser Alpen»: WIPF, in Vorb.). Das regional gesammelte Zahlenmaterial wird anschliessend gesamtschweizerisch zusammengefasst und vergleichend ausgewertet (NFP 31 Schlussbericht, MAISCH et al., in Vorb.). Im vorliegenden Artikel werden auszugsweise die Resultate einer auf das Mattertal beschränkten Gletscherstichprobe vorgestellt. Die verwendeten Daten entstammen dem von Bernhard Denzler im Rahmen seiner Projektmitarbeit im Gebiet zwischen Nufenenpass und Val d' Hérens erhobenen Datensatz (Inventarregion «Südliche Walliser Alpen»). Für die Auswertung der Gletscher-Schneegrenzen wurden zusätzlich die von Christof Benz im «Unterwallis» erfassten Gletscher miteinbezogen. Die Quervergleiche zur Vergletscherung im Arbeitsgebiet «Bündnerland» wurden der Veröffentlichung von MAISCH (1992) entnommen.

Zielsetzung

Der vorliegende Artikel zur ehemaligen wie künftigen Vergletscherung des Mattertales soll als ein regional geprägter und empirisch breit abgestützter aber ebenso auch spekulativer und «visionärer» Beitrag zum Problemkreis Klima-Gletscher-Umwelt verstanden werden. Am Beispiel des überdurchschnittlich stark vereisten Einzugsgebietes des Mattertals werden einerseits die individuellen Charakteristiken dieser majestätischen Gletscherregion im Bannkreis des Matterhorns vorgestellt. Andererseits werden daraus auch allgemeingültige und auf andere Gletscherregionen übertragbare Aussagen zur Hochstandssituation und zu den Veränderungen seit dem Ende des «Little Ice Age» abgeleitet. Mit Blick in die Zukunft wird anhand verschiedener Schneegrenzanstiegs-Szenarien sodann versucht, die Sensibilität der Mattertaler Gletscher gegenüber der prognostizierten Klimaänderung abzuschätzen und zu beurteilen.

Das Untersuchungsgebiet

Das Mattertal, eines der grossen südlichen Walliser Seitentäler der Rhône, wird durch die Mattervispa entwässert, deren Einzugsgebiet vom Theodulpass im Süden bis nach Stalden im Norden reicht (Abb. 1). Auf drei Seiten ist das Untersuchungsgebiet von mächtigen Viertausendern umgeben: Im Osten schliesst die Mischabel-Kette mit dem Dom, im Südosten die Monte Rosa-Gruppe mit der Dufourspitze, im Südwesten das Matterhorn und im Westen die Gipfel der Dent Blanche, Zinalrothorn und Weisshorn das Tal ab. Wuchtige Bergketten schirmen das Walliser Rhônetal von den niederschlagsbringenden Winden aus allen Richtungen ab. Deshalb zählt dieses Gebiet zu den trockensten Regionen der Schweiz. Am geringsten sind die Niederschlagsmengen im Mittelwallis sowie im Visper- und Mattertal (vgl. ATLAS DER SCHWEIZ, 19 67: Blatt 12, Meßstationen Visp, Ackersand, Grächen, Zermatt, Gornergrat und Furgghorn, UTTINGER 1965, 1966; ANNALEN der SMA 1979, 1980, 1991; vgl. Abb. 2). Typisch für dieses inneralpine Klima sind neben der Trockenheit eine geringe Bewölkung und damit eine grosse Sonneneinstrahlung sowie bedeutende tägliche und jahreszeitliche Temperaturschwankungen (SCHÜEPP *et al.*, 1978).

Das Mattertal ist bis weit nach Süden und bis in grosse Höhen sehr trocken. Erst nahe dem Südalpenkamm steigen die Niederschlagsmengen infolge des Übergreifens feuchter Luftmassen aus dem Süden rapide an. Ein Vergleich der Temperaturwerte zwischen einer Meßstation auf dem

Vergletscherung im Mattertal

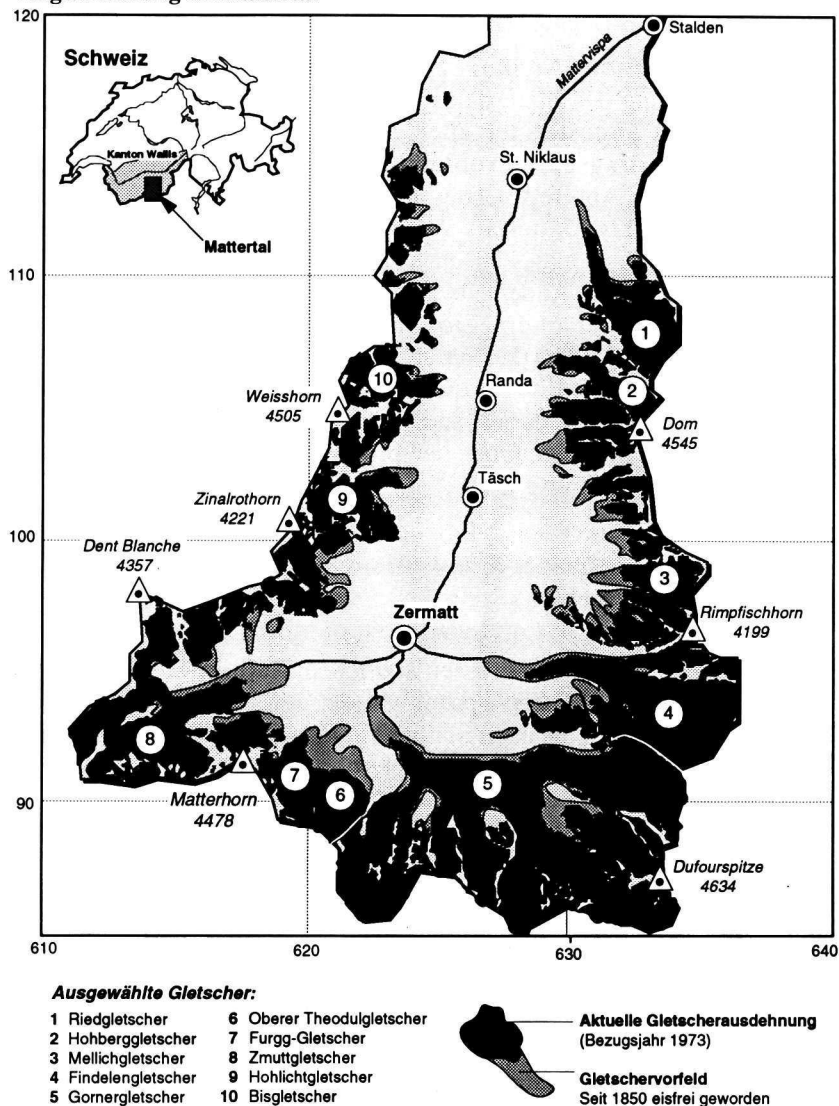


Abb.1. Karte des Untersuchungsgebietes und der Vergletscherung im Mattertal.

Nordalpenkamm (Jungfrauoch: 3579 m ü. M.) und auf dem Südalpenkamm (Testa Grigia: 3488 m ü. M.) lässt eine Wärmegunst der Südalpen von rund 1.5° C erkennen (SCHÜEPP, 1960).

Trotz des warmen und trockenen Klimacharakters weist das 500 km² grosse Einzugsgebiet Mattertal infolge der hohen randlichen Bergzüge mit 40 % Eisbedeckung einen überdurchschnittlichen Ver-

gletscherungsgrad auf. Von den zahlreichen imposanten Eisströmen gehören Gorner-, Findelen- und Zmuttgletscher zu den grössten und wohl auch attraktivsten der Schweizer Alpen. Zusammen mit dem Riedgletscher figurieren sie schon seit langer Zeit im Beobachtungsnetz der Schweizerischen Gletscherkommission (vgl. AELLEN, 1986, in: KASSER *et al.*, 1986; AELLEN, 1995; jährliche Berichte in: DIE ALPEN).

Niederschlagsprofil

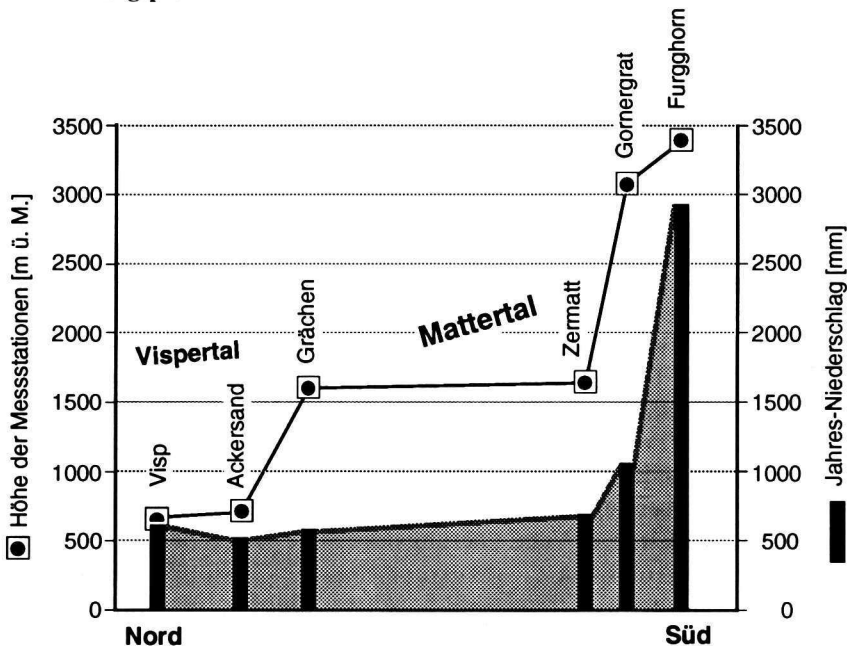


Abb. 2. Jahresniederschlagssummen der Messstationen im Tallängsprofil von Visp bis Furgghorn (Datenquellen: UTTINGER 1965, 1966; ANNALEN der SMA 1979, 1980, 1991).

ZUR METHODIK DER GLETSCHERERFASSUNG

Gletscherrekonstruktion und Parametrisierung

Für die Rohdatenerhebung wurden sämtliche vorhandenen und rekonstruierbaren Firn- und Eisflächen mit einer Mindestgrösse von 1 Hektare (0.01 km²) erfasst und bearbeitet. Erstes Arbeitsziel war die kartographische Rekonstruktion der Gletscher während ihrer

Hochstandsausdehnung 1850. Dieser Arbeitsschritt stützte sich vor allem auf die geomorphologische Analyse von Stereo-Luftbildpaaren. Die maximale Ausdehnung der Gletscher während des 1850er-Hochstandes ist häufig anhand von frischen Wallmoränen oder anderer Eisrandspuren sowie an deutlichen Bewuchsunterschieden zu erkennen. Wichtige Arbeitsgrundlage bildeten ausserdem die Original-Messtischblätter der Dufourkarte, welche von verschiedenen Autoren gerade im Zeitraum um die Mitte des letzten Jahrhunderts im Massstab 1:50'000 erstellt worden waren und die nachfolgend erschienenen Siegfriedatlas-Karten. Wertvolle Hilfe bei der Festlegung und Kontrolle der ehemaligen Gletscherumrisse leisteten folgende im Mattertal durchgeführten gletschergeschichtlichen Arbeiten: RÖTHLISBERGER, 1976; BOHNENBLUST, 1988; HOLZHAUSER, 1985, 1995; SOMMER, 1988. Zur Abklärung komplizierter Verhältnisse wurden in einigen Fällen auch Feldbegehungen vorgenommen.

Als Grundlage für die Abgrenzung und Erfassung der heutigen «aktuellen» Gletscherausdehnung dienten die Originalkarten des Schweizerischen Gletscherinventars (MÜLLER et al., 1976). Diese beruhen auf Luftbildserien aus dem Spätsommer 1973 (Schwarz-weiss Bilder im Format 13 x 13 cm). Aufgrund glaziologischer Überlegungen mussten nach der Konsultation und Neuauswertung der Original-Luftbilder einige Änderungen in der Gliederung vorgenommen werden (v. a. Auftrennung von Eisflächen-Gruppen). Bei stark abweichender Interpretation musste auch die Abgrenzung einzelner Gletscherränder überarbeitet und angepasst werden (z. B. Verkleinerung der Zunge des Findelengletschers, vgl. Abb. 3). Am Ende dieses Arbeitsschrittes resultierte für jeden Gletscher eine auf einer transparenten Deckfolie angefertigte Rekonstruktionszeichnung im Massstab 1:25'000, anhand derer die Parametrisierung erfolgte.

Für jeden Gletscher wurden ungefähr 50 verschiedene Parameter entweder direkt abgelesen (z. B. Höhenangaben) bzw. gemessen (z. B. Flächen- und Längenwerte) oder rechnerisch abgeleitet (z. B. Schneegrenzen, Gefällsverhältnisse, sämtliche Differenzwerte 1850-1973). In Abb. 3 werden am Beispiel des Findelengletschers und der benachbarten Eisflächen einige wichtige und auch in diesem Beitrag analysierte Gletscher-Parameter veranschaulicht.

Teilmengenbildung

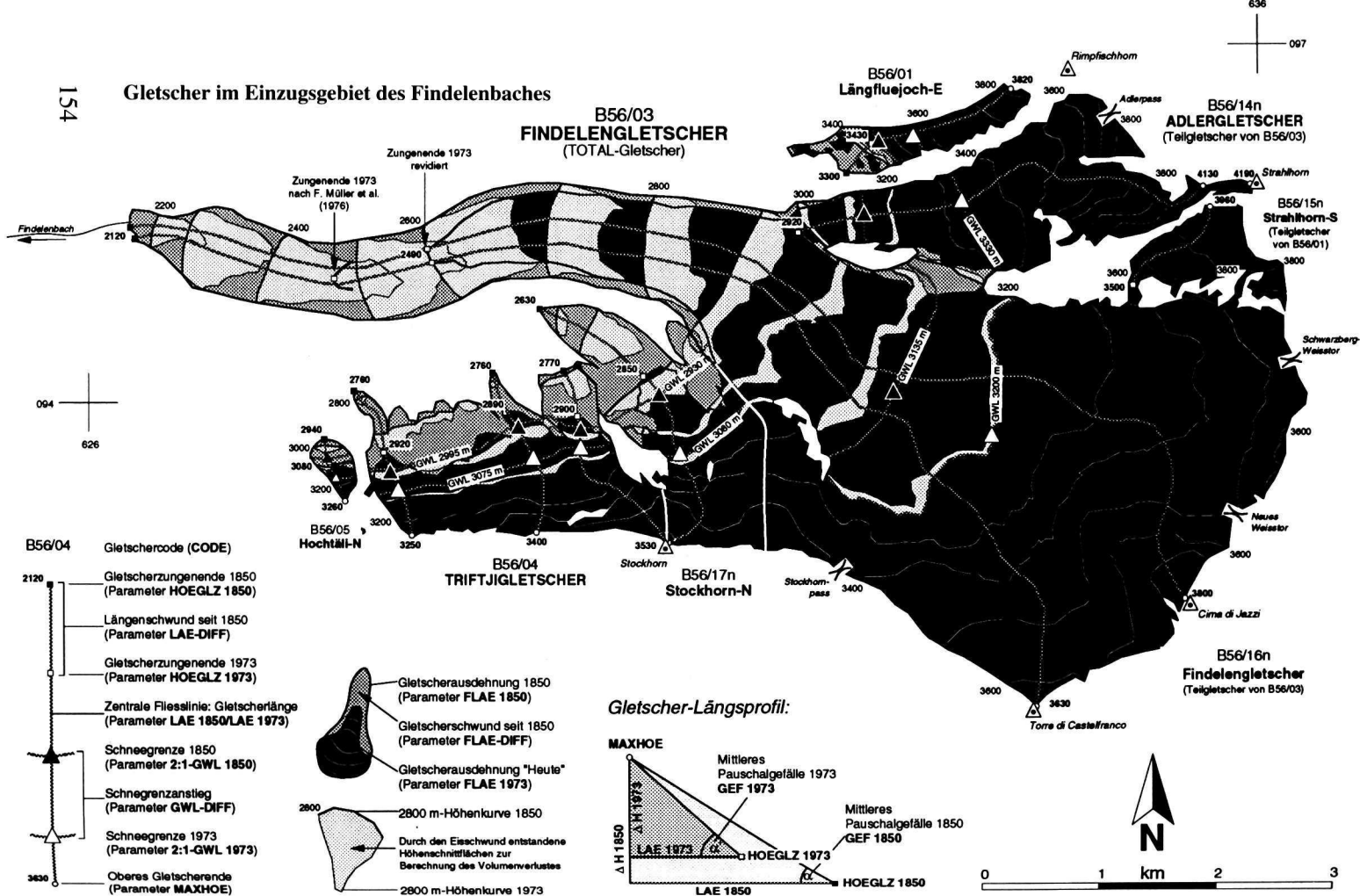
Im Mattertal wurden für das Bezugsjahr 1850 insgesamt 96 Einzelgletscher registriert (Abb. 1). Darunter befinden sich neun sog. «Total-Gletscher», die sich infolge des Zurückschmelzens bis 1973 in

24 selbständige sog. «Teilgletscher» aufgetrennt haben. In einigen komplexeren Fällen wurden über längere Strecken parallel fließende grössere Eisströme entlang ihrer Mittelmoränen voneinander abgegrenzt und separat parametrisiert (z. B. der Gornergletscher in sechs, Findelengletscher in drei Teilströme). In der Zeit zwischen den beiden Aufnahmejahren (1850-1973) sind zwei ehemalige Firnflecken vollständig abgeschmolzen. Für die Statistik ergeben sich somit für das Bezugsjahr 1973 insgesamt 94 (Stichprobe mit «Total-Gletschern») bzw. 109 (Stichprobe mit «Teilgletschern») Eisflächen. Je nach Fragestellung wurden aus den Rohdaten verschiedene Teilmengen gebildet. In die Teilmenge «FLÄCHEN-Paare» wurden nur diejenigen Gletscher aufgenommen, deren Ausdehnung für beide Bezugsjahre verlässlich abgegrenzt und ausgemessen werden konnte. Diese 71 Einheiten umfassende Stichprobe wurde z. B. für die regionale Flächen(veränderungs)statistik sowie für die Volumenverlust-Abschätzungen verwendet. Die Stichprobe «GWL-Paare» umfasst nur diejenigen 68 Gletscher, deren 2:1-Gleichgewichtslinie für beide Aufnahmezeitpunkte bestimmt werden konnte!

VERGLETSCHERUNG UND GLETSCHERSCHWUND

Flächen und Flächenschwund

Die Grössenverteilung der Mattertaler Gletscher ist extrem asymmetrisch strukturiert (vgl. Abb. 4). Den vielen sehr kleinen und kleinsten Gletscher- und Firnflecken stehen nur einige wenige grössere Eisströme gegenüber. Dieser Befund kommt in der dichten Scharung der Flächenwerte am linken Rand der Darstellung gut zum Ausdruck. Rund 90 % aller Eisflächen sind kleiner als 5 km², 60 % geringer als 1 km² und über ein Viertel erreicht kaum 0.5 km². Flächenmässig dominieren im Mattertal drei Eisströme vom Typus «Tal-gletscher» (Tab. 1). Der Gornergletscher, nach dem Grossen Aletschgletscher der zweitmächtigste Eisstrom der Schweizer Alpen, ist beinahe 3.5 mal so gross wie die nachfolgenden Findelen- und Zmuttgletscher. Alle drei Gletscher liegen im hinteren Talkessel des Matternales. Damit profitieren sie von den über den Südalpenkamm nach Norden ausgreifenden niederschlagsbringenden Wetterlagen. Ihre Grösse ist auch die naturgegebene Folge der weit ausgedehnten und hoch gelegenen (Nährgebiets-) Flächen.



Grösste Gletscher im Mattertal

Gletschername	FLAE 1850	FLAE 1973	FLAE-DIFF	
	[km ²]	[km ²]	abs. [km ²]	rel. [%]
Gornergletscher	65.98	59.73	6.25	9.5
Findelengletscher	19.96	17.36	2.60	13.0
Zmuttgletscher	19.81	16.89	2.92	14.7
Riedgletscher	8.96	8.22	0.73	8.2
Furgg-Gletscher	7.59	5.42	2.17	28.6
Hohlichtgletscher	6.50	5.49	1.02	15.6
Bisgletscher	5.08	4.72	0.36	7.0
Oberer Theodulgletscher	4.87	3.40	1.47	30.2
Mellichgletscher	4.67	3.73	0.93	20.0
Hohberggletscher	3.81	3.41	0.40	10.5

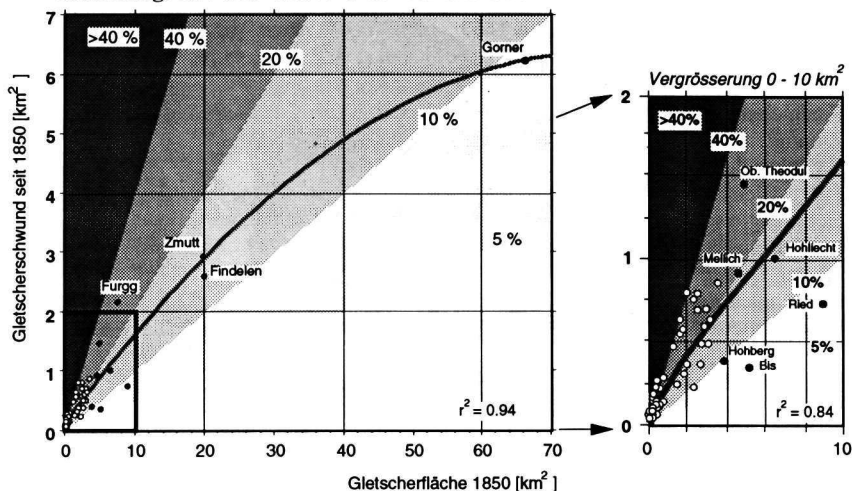
Tab. 1. Die zehn grössten Gletscher des Mattertales, angeordnet nach den Flächenwerten 1850 (Parameter FLAE 1850). Zur Lage der Gletscher vgl. Karte in Abb. 1.

Für die Stichprobe FLÄCHEN-Paare ($n = 71$) bemass sich 1850 die gesamte vergletscherte Fläche im Mattertal auf 200.6 km². Sie verminderte sich bis 1973 um 33.4 km² auf 167.2 km². Dies entspricht einem relativen Eisflächenschwund von 16.7 % (Tab. 2).

Zwischen der Gletschergrösse (Parameter FLAE 1850) und dem Gletscherschwund (Parameter FLAE-DIFF) besteht ein deutlicher statistischer und glaziologisch erklärbarer Zusammenhang (Abb. 4): Je grösser die Ausgangsfläche war, desto grösser fällt der absolute Schwundbetrag aus, aber umso kleiner der relative. Dies bedeutet, dass grosse Gletscher zwar ansehnlichere Flächenareale eingebüsst haben, der Anteil dieses Verlustes an ihrem «Gesamt-Kapital» hingegen relativ klein ist. Diese Grössenabhängigkeit kann geradezu als generelle Gesetzmässigkeit für vergangene wie auch für künftige Schwundperioden gelten. Dieser Befund wurde nämlich auch schon für die Inventarregione Bündnerland (MAISCH, 1992) und Gotthard (BATTAGLIA, 1994) sowie auch für die Österreichischen Gletschergebiete (GROSS, 1987; LIEB, 1993) konstatiert. Da die mittlere 1850er-Gletschergrösse im Mattertal ($\bar{\varnothing}$ ca. 2.8 km²) diejenige im Gotthardgebiet ($\bar{\varnothing}$ ca. 0.7 km²) und im Bündnerland ($\bar{\varnothing}$ ca. 0.8 km²) etwa um das Vierfache übertrifft, erstaunt es nicht, dass auch der regionale Schwundanteil von 16.7 % wesentlich tiefer liegt als in den Vergleichsregionen Gotthard (35.7 %) und Bündnerland (39.7 %). Bei sämtlichen Schweizer Gletschern ($\bar{\varnothing}$ ca. 1.1 km²) beträgt der relative Flächenschwund 27.2 % (MAISCH *et al.*, in Vorb.).

Abb. 3. Gletscher im Einzugsgebiet des Findelenbaches zur Veranschaulichung der Rekonstruktionsmethode und einiger wichtiger Parameter.

Gletschergrösse und Gletscherschwund seit 1850



Sektoren des relativen Flächenschwundes:

5 bis <10 % 10 bis <20 % 20 bis <40 % >40 %

Abb. 4. Zusammenhang zwischen Gletschergrösse (Fläche 1850) und Gletscherschwund seit 1850. Der Bereich 0 bis 10 km² ist im Ausschnitt rechts vergrössert dargestellt. Die in verschiedenen Graustufen gefärbten Sektoren repräsentieren das Ausmass des relativen Gletscherschwundes (Teilmenge FLÄCHEN-Paare, n = 71).

Gletscherflächen und Gletscherflächenschwund (getrennt nach Expositionen)

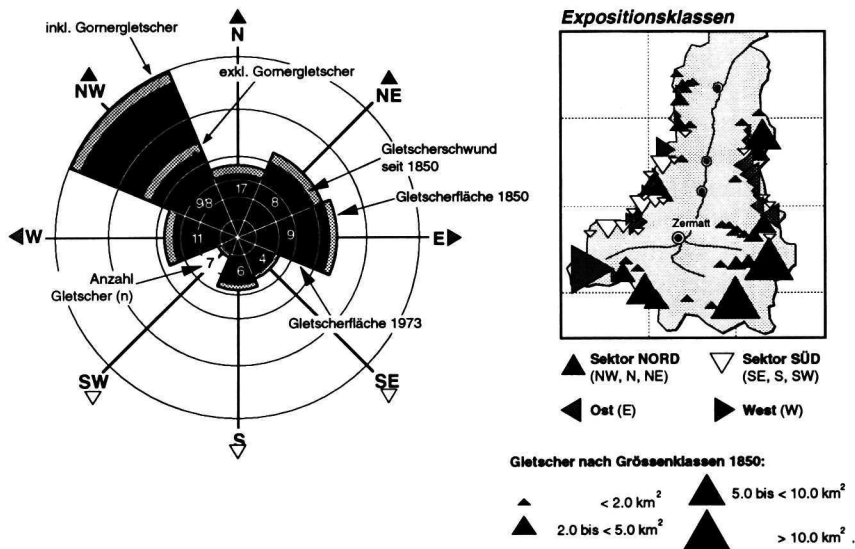


Abb. 5. Gletscherflächen und Gletscherflächenschwund seit 1850, gegliedert nach den Haupt-Expositionsklassen (Teilmenge FLÄCHEN-Paare, n = 71).

Flächenwerte Mattertal

Parameter	Einheit	Ø	σ	Min.	Max.	Σ	Prozent Verlust
FLAE 1850	[km ²]	2.8	± 8.4	0.01	65.98	200.6	
FLAE 1973	[km ²]	2.4	± 7.6	0.01	59.73	167.2	
FLAE-DIFF	[km ²]	0.4	± 0.9	0.00	6.25	33.4	16.7 %

Tab. 2. Zusammenstellung der Flächenwerte (Parameter FLAE 1850/1973) und der Flächenschwundbeträge (Parameter FLAE-DIFF) der Gletscher im Mattertal (Teilmenge FLÄCHEN-Paare, n = 71).

Expositionsverteilung

Anzahlmässig überwiegt der strahlungs- und ablationsgeschützte NORD-Sektor (Expositionen NW-N-NE) mit 34 Gletschern (48 %) deutlich gegenüber den 17 Eisflächen (24 %) des SÜD-Sektors (Expositionen SW-S-SE; vgl. Abb. 5). Diese ungleiche Belegungsdichte hängt mit der nach Norden offenen Ausrichtung des Mattertales zusammen, wodurch potentielle Nährgebiete in südlicher Exposition weitgehend fehlen. Naturgegeben sind Südlagen erst auf der italienischen Seite des Alpenhauptkammes vermehrt anzutreffen. Flächenmässig hebt sich die NW-Exposition markant ab, enthält sie doch sowohl den Gorner- wie auch den Findelengletscher. Entsprechend klar dominiert auch der gesamte NORD-Sektor mit 140 km² (1850: 70 %) bzw. 118 km² (1973: 71 %) über den SÜD-Sektor, der nur etwa einen Zehntel der gesamten Vergletscherung aufweist (1850: 16 km², 8 %; 1973: 12 km², 7 %). Die restlichen Eisflächen verteilen sich ungefähr hälftig auf die Ost- und West-Exposition, wobei die erstgenannte wegen des grossen Zmuttgletschers stärker hervortritt.

Volumen und Volumenschwund

Die Frage nach den ehemals wie gegenwärtig vorhandenen Eis-, bzw. Wasserreserven kann nur annäherungsweise und indirekt über empirisch hergeleitete Ansätze zur Eisdicken-Abschätzung beantwortet werden (vgl. MAISCH, 1992). Dazu wurde für jeden Gletscher aufgrund der Flächenangaben die mittlere Eisdicke (Parameter MIDICK 1850/1973) und daraus das Gesamtvolumen, bzw. die Volumenänderungen im Zeitraum seit 1850 berechnet und aufsummiert. Aus methodischen Gründen muss im Einzelfall mit grossen Abweichungen (ca. ± 30 % der Eisdicke) gerechnet werden (Tab. 3):

Dicken - und Volumenwerte

Parameter	Einheit	Ø	σ	Min.	Max.	Σ	Prozent. Verlust.
MIDICK 1850g	[m]	27.7	±18.6	12.1	132.4		
MIDICK 1973g	[m]	24.9	±18.2	0.0	126.4		
MIDICK-DIFFg	[m]	2.8	±2.6	0.0	16.1		10.1 %
VOL 1850g	[km ³]	0.218	±1.059	0.0	8.738	15.489	
VOL 1973g	[km ³]	0.179	±0.911	0.0	7.537	12.696	
VOL-DIFFg	[km ³]	0.039	±0.150	0.0	1.201	2.803	18.1 %

Tab. 3. Zusammenstellung der geschätzten (=g) mittleren Dickenwerte (Parameter MIDICK 1850/1973g) und der geschätzten Volumenwerte (Parameter VOL 1850/1973g) sowie der Volumenschwundbeträge (Parameter VOL-DIFFg) der Gletscher im Mattertal (Teilmenge FLÄCHEN-Paare, n = 71; Werte stark gerundet).

Nach den vorliegenden Schätzungen sind die Mattertaler Gletscher im pauschalen Mittel zwischen 25 und 30 Meter dick. Wegen seiner immensen Grösse sticht der Gornergletscher mit geschätzten Eisdicken von gut über 120 Metern und einem Verlustvolumen von 1.2 km³ auch hier als Extremwert deutlich hervor. Gesamthaft hat sich das Eisvolumen im Zeitraum seit 1850 von rund 15.5 km³ um gut einen Sechstel auf 12.7 km³ reduziert. Die «verflüssigte» Eiskubatur von 2.8 km³ entspricht einem Wasseräquivalent von ca. 2.5 km³ und damit beinahe der fünffachen Menge eines mittleren jährlichen Abflusses der Vispa bei der Station Visp (Jahresmenge: ca. 0.533 km³, Messperiode 1985-1992, Einzugsgebiet inkl. Saasertal rund 778 km², Vergletscherungsgrad 29.5 %; vgl. HYDROL. JAHRBUCH DER SCHWEIZ, 1992) oder etwa dem Inhalt des Walensees (2.49 km³; vgl. JUNG, 1990).

GLETSCHER-SCHNEEGRENZEN

Bestimmungsverfahren

Für die Analyse des Beziehungsgefüges zwischen «Klima» und «Gletscher» spielt die Bestimmung und Auswertung von Schneegrenzen und deren räumlicher und zeitlicher Variation eine zentrale Rolle. Als «Schneegrenze» (oder klarer ausgedrückt: als «Gletscher-Schneegrenze») wird hier die durchschnittliche Lage der Gleichgewichtslinie im Mittel über mehrere Jahre bei ausgeglichenem Massenhaushalt verstanden. Die Gleichgewichtslinie (GWL) bildet definitionsgemäss am Ende des Haushaltsjahres die Trennlinie zwischen Nährgebiet (Akkumulationszone **Sc** mit Netto-Massengewinn) und Zehrgebiet (Ablationszone **Sa** mit Netto-Massenverlust). Die mittlere Höhenlage dieser «langjährigen»

Gleichgewichtslinie kann für jede Gletscheroberfläche in guter Annäherung mit der sog. «2:1-Flächenteilungsmethode» bestimmt werden. Dieses Verfahren stützt sich auf die glaziologische, z.B. durch die Analyse der Moränenansatzstellen empirisch überprüfbare Faustregel, wonach die Gesamtfläche eines Gletschers (S) durch ebendiese Schneegrenze in einem mittleren Sc:Sa-Verhältnis von 2:1 geteilt wird (MAISCH, 1992). Die Höhenangaben zur Schneegrenze wurden routinemässig mit Hilfe eines einfachen Computer-Programmes automatisch berechnet, welches die individuellen hypsographischen Verhältnisse (Flächen-Höhenverteilung) verwendet. Die resultierenden Höhenwerte sind im Datensatz als Parameter 2:1-GWL 1850, bzw. 2:1-GWL 1973 abgelegt.

Räumliche Variation der Schneegrenzen

In Abb. 6 sind in einem West-Ost-Profil durch die südlichen Walliser Alpen die 2:1-GWL-Parameter der Gletscher im NORD-Sektor (Expositionen NW, N und NE) für das Bezugsjahr 1973 dargestellt. Es kommt sehr klar zum Ausdruck, dass die Mittelwerte sowie der hier als «Kernzone der Vergletscherung» bezeichnete Höhengürtel von Region zu Region ganz deutlich variieren. Ausgehend von den tiefstgelegenen Höhenstufen im Unterwallis (Region Tour Sallière: 2:1-GWL 1973 Ø 2420 m) steigen sie auffällig nach Osten an und kulminieren in den offensichtlich trockeneren Gebirgsgruppen Mt. Blanc de Cheilon (Ø 2985 m), Dent Blanche (Ø 3020 m) und ausgeprägt im Monte Rosa-Gebiet (Ø 3115 m). Dies sind im gesamten Alpenraum die höchsten Schneegrenzlagen überhaupt. Mit abnehmenden Gipfelkranzhöhen und dadurch potentiell verstärkter Niederschlagszufuhr durch feuchtebringende Südwindlagen sinken die Gletscher-Schneegrenzen dann weiter gegen Osten in Richtung Nufenenpass wieder markant ab. Diese Raumstruktur widerspiegelt im Haupttrend das von HAEBERLI (1990) in einem als «Kryosphärenmodell» bezeichneten Schema dargestellte Beziehungsgefüge (vgl. auch HÖLZLE, 1994). Danach existieren Gletscher (bzw. deren 2:1-GWL) bei grösserem Niederschlagsangebot in tieferen, d. h. wärmeren Umgebungen, während sie mit abnehmender Akkumulation erst in höheren, d. h. kälteren Lagen vorkommen können. Empirisch bestätigt wurde dieses Konzept bereits im Bündnerland. Dort steigen die 2:1-GWL-Werte von den niederschlagsreicheren Nordalpenrandgebieten (z. B. Tödi, Flims-Pizol) markant in Richtung der inneralpin gelegenen und durch Randketten geschützten Trockenzonen (Bernina, Unterengadin) an, um dann gegen

den feuchter werdenden Südalpenrand (Bergell) wieder steil abzusinken (MAISCH, 1992).

Schneegrenzanstieg im Zeitraum 1850-1973

Als eigentliche Ursache des Gletscherschwundes seit 1850 kann aus glaziologischer Sicht das generelle Ansteigen der Gletscher-Schneegrenzen und die längerfristig damit verbundene negativen Massenbilanzverhältnisse verantwortlich gemacht werden. Der Schneegrenzanstieg seit 1850 (Parameter GWL-DIFF) kann als Differenz der Parameter 2:1-GWL 1973 und 2:1-GWL 1850 berechnet werden. Dieser Betrag kann als geometrische und lineare Antwort des Gletschers auf die Veränderung sämtlicher Massenhaushalts- und Klimaparameter seit 1850 verstanden werden. Vorerst lässt er sich allerdings noch nicht befriedigend in seine klimatologischen Einzelkomponenten zerlegen (z.B. Anteile von Temperatur und Niederschlag). In starker Vereinfachung lassen sich aber der Gletscherschwund seit 1850 und damit auch die GWL-DIFF-Werte hauptsächlich als direkter Ausdruck eines Temperaturanstieges seit 1850 in der Grössenordnung von 0.5° bis 0.7° C interpretieren.

Im Mattertal sind die Schneegrenzen im Mittel sämtlicher Gletscher um +71 Meter (Standardabweichung ± 49 m) angestiegen. Dieser Betrag weicht gegenüber den in den östlichen Schweizer Alpen auftretenden Wertebereichen (Bündnerland: +77 m) nur geringfügig und nicht signifikant ab. Die Streuung der Einzelwerte (Min.: -15 m; Max: +170 m) ist auch im Mattertal sehr gross. Deutlich vom Mittelwert abweichende Anstiegsbeträge können nun aber nicht klimatisch gedeutet, sondern müssen gletscherindividuell interpretiert werden. Sie sind primär auf die unterschiedliche Gletscheroberflächen-Topographie (Verflachungen, Verteilungen) und die oft individuelle Schwundreaktion (Abbrüche, markantes Einsinken der Eisoberfläche) sowie einige Spezialfälle (z. B. Gletscher mit starken Flächenverlusten auch im Nährgebiet) zurückzuführen.

Bei überregionaler Betrachtungsweise (vgl. Abb. 6: Abstand der Trendoberflächen 1850 und 1973) zeichnet sich jedoch eine leichte Tendenz ab, wonach die Anstiegsbeträge im feuchteren, noch zum Mont Blanc Massiv gehörenden Unterwallis etwas geringer sind (Tour Sallière: \emptyset +28 m, Aiguilles d' Argentière: \emptyset +58 m), gegen das trockenere Zentrum leicht grösser ausfallen (Grand Combin: \emptyset +75 m; Dent Blanche: \emptyset +71 m, Monte Rosa: \emptyset +71 m, Weissmies: \emptyset +100 m), um dann in östliche Richtung wieder abzunehmen (Monte Leone: \emptyset +53 m; Blinnenhorn: \emptyset +54 m). Die Unterschiede von Region zu Region sind jedoch nicht in allen Fällen signifikant. Die Hypothese einer aus

klimatologischer Sicht wohl als niederschlagsbedingt zu interpretierenden Trendcharakteristik des Schneegrenz-Anstiegs bedarf deshalb auch in den Walliser Alpen, vor allem durch den Einbezug der Nordtäler und der angrenzenden Berner Alpen (WIPF, in Vorb.) noch einer kritischen Überprüfung.

Räumliche Struktur der Schneegrenzen

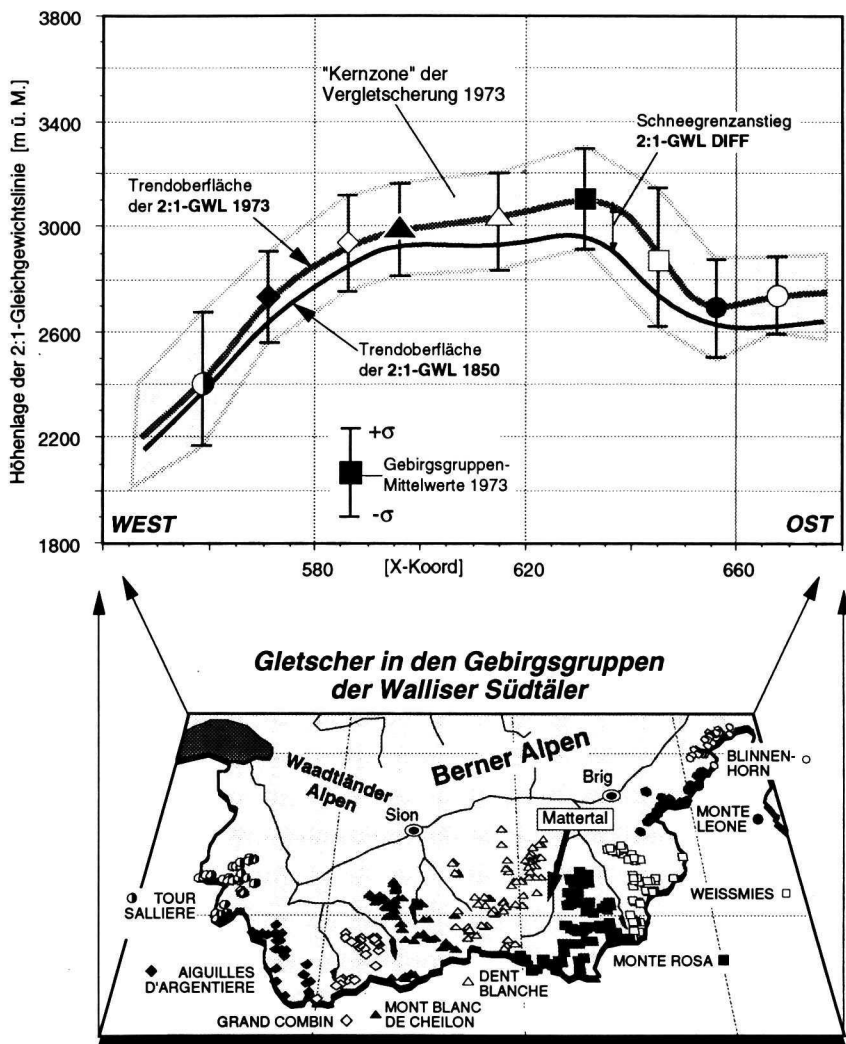


Abb. 6. Räumliche Struktur der Gletscher-Schneegrenzen (Parameter 2:1-GWL 1850/1973) in einem West-Ost Profil zwischen den Gebirgsregionen Tour Sallière und Blinnenhorn. Dargestellt sind die regionalen Mittelwerte der Gletscher im NORD-Sektor (NW, N, NE; inkl. einfacher Standardabweichung des Bezugsjahres 1973, Teilmengen GWL-Paare).

Schneegrenzanstiegs-Szenarien

Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung der Mattertaler Vergletscherung wurden in äquidistanten Teilschritten verschiedene «Schneegrenzanstiegs-Szenarien» definiert (2:1-GWL-Szenarien +100 m, +200 m, +300 m etc.). Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, dass ein Gletscher grundsätzlich nur solange bestehen bleiben kann, als sich seine Gleichgewichtslinie längerfristig im Höhenintervall zwischen der heutigen 2:1-GWL und dem oberen Eisrand befindet. Der Höhenunterschied zwischen der heutigen Schneegrenzlage (Parameter 2:1-GWL 1973) und dem höchsten Gletscherpunkt (Parameter MAXHOE), das sog. «kritische Schneegrenz-Intervall», wird so zum Mass für die Überlebenschancen eines jeden Gletschers. Die statistische Auswertung einer schrittweisen Klassierungsabfolge liefert nun für jedes angenommene GWL-Szenario direkt die Angaben, wieviele Gletscher als «wegschmelzend» oder als «verbleibend» einzustufen sind.

Der zu erwartenden absolute Flächenschwund lässt sich nur mittels der Flächen-Höhenverteilung im Ausmass etwa abschätzen. Dazu wurde die gesamte Mattertaler Vergletscherung in ihrer hypsographischen Verteilung aufgerechnet. Aus der Summenkurve der Gesamtvergletscherung liess sich so die mittlere Höhenlage der gesamtregionalen 2:1-GWL 1973 auf 3085 m bestimmen. In Abständen von jeweils 100 Metern wurde nun diese Ausgangslage sukzessive angehoben (+100 m: 3185 m; +200 m: 3285 m; +300 m: 3385 m etc.). Daraus liess sich unmittelbar die Verkleinerung der Nährgebietsflächen berechnen. Unter Wahrung des Sc:Sa-Teilungsverhältnisses von 2:1 konnte nun das zu erwartende Schrumpfen der Zehrgebietsareale in Prozenten der Ausgangsflächen hergeleitet und dargestellt werden.

Ablauf und Ausmass des mutmasslichen Eiszerfalls

Die sechs Darstellungen in Abb. 7 veranschaulichen als «kartographische Momentaufnahmen» das sukzessive Verschwinden der Mattertaler Gletscher als Auswirkung der «hypothetischen» Schneegrenzanstiegs-Szenarien (GWL-Szenarien +100 m bis +1300 m). In Abb. 8 sind die prognostizierten Veränderungen der Gletscher nach Anzahl und Flächenausdehnung zudem in einem «Zerfallskurven-Diagramm» dargestellt. Zu Vergleichszwecken wurden darin die Schwundkurven ausgewählter Bündner Regionen mit Extrem-

charakteristik miteinbezogen. Die Region Bernina ist dabei die gegenwärtig am stärksten, die Region Unterengadin die am schwächsten vereiste Gebirgsgruppe im Bündnerland (MAISCH, 1992).

Als Richtwerte resultieren, mit wachsender Unsicherheit der Voraussagen, folgende Prognosen für das Mattertal (Tab. 4):

Schwund-Szenarien: Prognosen für das Mattertal

Szenario-Stufe	Anteil wegschm. Gletscher (Anzahl)	Anteil wegschm. Fläche	Schwundbeträge absolut
0 m	0 %	0 %	0 km ²
+ 100 m	- 16 %	- 14 %	- 24 km ²
+ 200 m	- 40 %	- 30 %	- 51 km ²
+ 300 m	- 53 %	- 44 %	- 75 km ²
+ 400 m	- 59 %	- 59 %	- 100 km ²
+ 500 m	- 68 %	- 71 %	- 121 km ²
+ 600 m	- 71 %	- 79 %	- 134 km ²
+ 700 m	- 73 %	- 85 %	- 145 km ²
+ 800 m	- 78 %	- 90 %	- 153 km ²
+1000 m	- 82 %	- 95 %	- 162 km ²
+1300 m	- 98 %	- 99 %	- 168 km ²

Tab. 4. Die entsprechend den verschiedenen Schneegrenzanstiegs-Szenarien zu erwartenden Veränderungen der Gletscher im Mattertal nach deren Anzahl und Fläche (Stichprobe FLÄCHEN-Paare mit Teilgletschern, n = 94).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bis zum GWL-Szenario +300 m bereits gut die Hälfte der Gletscher zurückgebildet haben wird. Naturgemäss betrifft der Rückgang vorerst hauptsächlich die kleinen Firn- und Gletscherflecken. Der Flächenschwund bleibt dabei vorerst prozentual hinter der Abnahme der Gletscherzahl zurück, da die vollständig wegschmelzenden Gletscherflecken absolut nur wenig zum Arealverlust der schwindenden Gesamtvergletscherung beitragen. Bei GWL-Szenario +400 m sind rund 3/5 aller Gletscher und Gletscherflächen verschwunden. Danach wird das Zerfallsbild zunehmend durch das Schrumpfen der grösseren Gletscherströme geprägt. Im Unterschied zum Gesamtbild der Bündner Kurven fällt auf, dass die Entwicklung im Mattertal markant langsamer zu verlaufen scheint und kaum Anzeichen einer Zunahme der Zerfallsintensität im sog. «kritischen Bereich des beschleunigten Eiszerfalls» der GWL-Szenarien +100 m bis +300 m zeigt. Die künftige Entgletscherung im Mattertal vollzieht sich also mehr oder weniger proportional zu den Anstiegs-Szenarien. Dieses Verhalten unterstreicht ganz allgemein die offensichtliche Trägheit grösserer und mit ihren Einzugsgebieten noch genügend hoch hinaufreichender Gletscher(regionen) gegenüber künftigen (wie auch vergangenen) Klimaänderungen.

Dynamik des Gletscherschwundes

Wie schnell werden nun aber die Gletscher tatsächlich zurück-schwinden? Es bleibt nach wie vor sehr spekulativ, Aussagen über die Eintretenswahrscheinlichkeit und damit die Dynamik der hier schrittweise

Gletscherschwund-Szenarien Mattertal

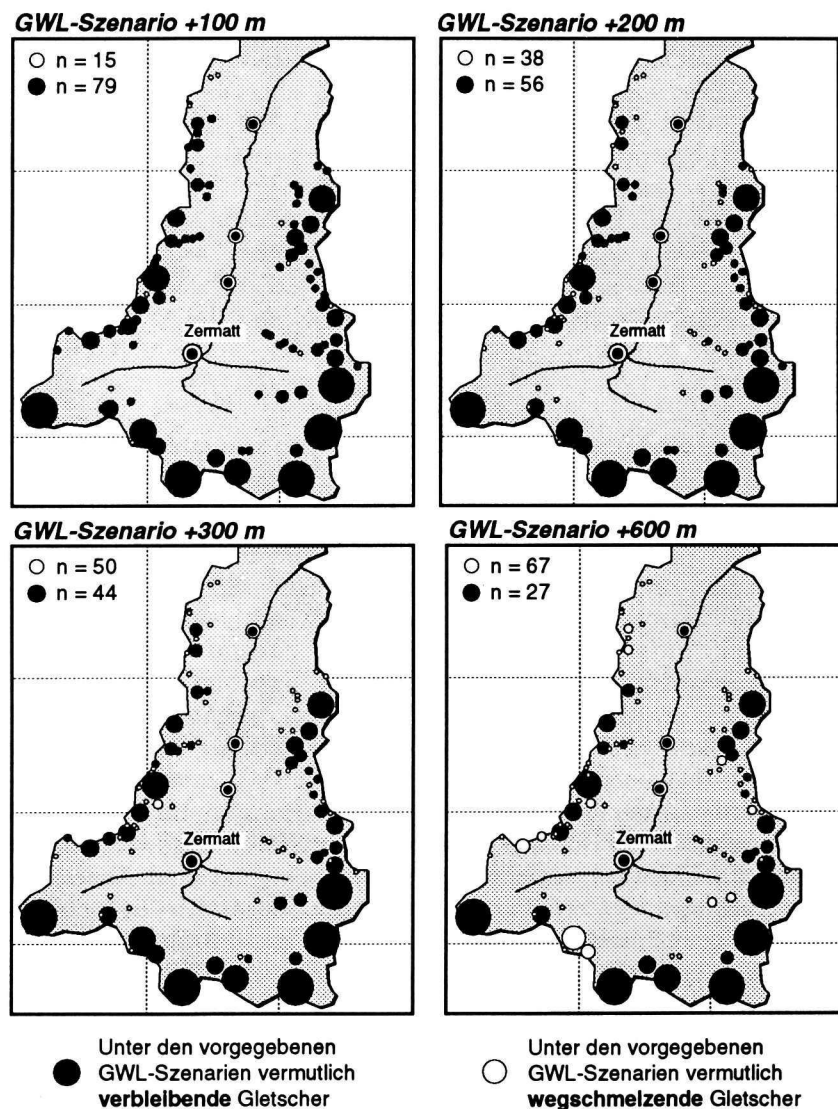
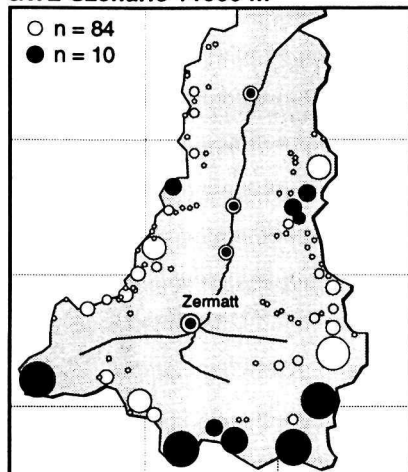


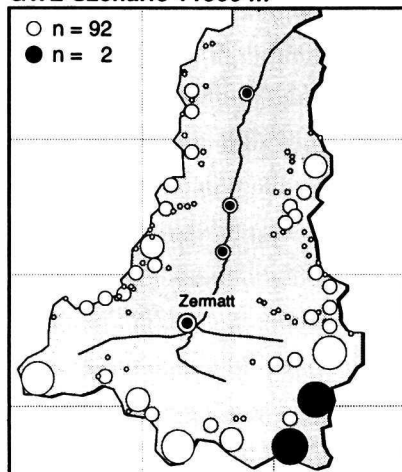
Abb. 7a. Gletscherschwund-Szenarien Mattertal (+100, +200, +300, +600 m). Dargestellt sind die beim Eintreten der entsprechenden Schneegrenzanstiegs-Szenarien vermutlich «verbleibenden», bzw. «wegschmelzenden Gletscher», gegliedert nach Grössenklassen.

vorausberechneten Szenario-Zustände zu machen. Einerseits bestehen noch grosse Unsicherheiten bezüglich Art, Ausmass und Geschwindigkeit der erwarteten Klimaverschiebung. Hinzu kommt noch die Schwierigkeit, die aus Klimamodellen abgeleiteten Parameter (z.B. Temperatur, Niederschlag, Bewölkung, Strahlung etc.) unmittelbar in eine direkt die Gletscherreaktion beschreibende Sprache zu übersetzen.

GWL-Szenario +1000 m



GWL-Szenario +1300 m



Grössenklassen:

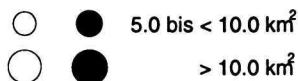
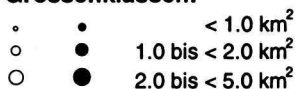


Abb. 7b. Gletscherschwund-Szenarien Mattertal (+1000, +1300 m). Dargestellt sind die beim Eintreten der entsprechenden Schneegrenzanstiegs-Szenarien vermutlich «verbleibenden», bzw. «wegschmelzenden Gletscher», gegliedert nach Grössenklassen.

Gemäss den von der Programmleitung des NFP 31 vorgegebenen Prognosen zur künftigen Klimaentwicklung muss unter dem sog. Szenario A («Business as usual-Szenario»; IPCC 1991) mit folgenden Veränderungen und Annahmen gerechnet werden: Im Gebiet der westlichen Schweizer Alpen steigen die für die Ablationsperiode der Gletscher entscheidenden Sommertemperaturen im Vergleich zum Zeitraum 1800 A.D. bis ins Jahr 2030 um +2.3° C und bis 2100 um +4.5° C an, währenddem die Niederschläge bis 2030 um -7.5 %, bis 2100 um -10 % abnehmen und damit durch Reduktion der Akkumulation die GWL-Anstiegstendenz grundsätzlich verstärken dürften. Zur

Gletscherschwund-Szenarien

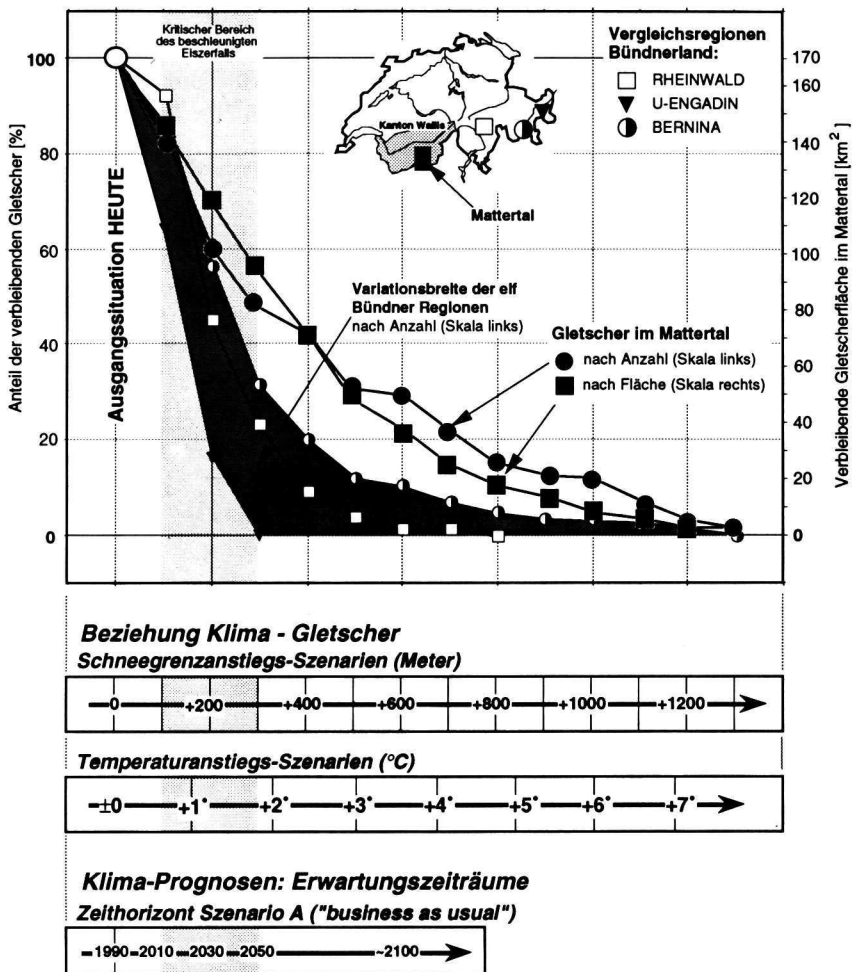


Abb.8. Gletscherschwund-Szenarien für das Mattental im Vergleich zu ausgewählten Regionen des Bündnerlandes. Dargestellt sind der Anteil der verbleibenden Gletscher (nach Anzahl und Fläche, Skala links) sowie die absoluten Anteile (Skala rechts) der verbleibenden Gletscherflächen im Mattental gemäss den entsprechenden Temperatur- und Schneegrenzanstiegs-Szenarien.

Definition der «heutigen» Ausgangslage wurde von diesen Vorgaben die Veränderungen im Zeitraum «1800» bis ca. «1990» subtrahiert (grosszügig auf ca. 1.1° C geschätzt). Zur Verknüpfung zwischen Temperatur- mit GWL-Anstiegswerten wurde vereinfachend eine empirisch gefundene Beziehung von 0.6°/100 m verwendet (vgl. KUHN, 1990, MAISCH, 1992, 1995).

Mit diesen Vorgaben ergeben sich, mit wachsendem Spekulationsgrad, untenstehende provisorische Richtwerte zum «Fahrplan» des mutmasslichen Eiszerfalls in den Walliser Alpen (Tab. 5).

Gletscherschwund-Szenarien für die Walliser Alpen

GWL-Szenario	Δ Temp.	Erwartungs-Zeitraum
\pm 0 m	$\pm 0^\circ$	~1990
+ 100 m	ca. $+0.6^\circ$	~2010
+ 200 m	ca. $+1.2^\circ$	~2030
+ 300 m	ca. $+1.8^\circ$	~2050
+ 400 m	ca. $+2.4^\circ$	~2070
+ 500 m	ca. $+3.0^\circ$	~2090
+ 600 m	ca. $+3.6^\circ$	zunehmend spekulativ
+1000 m	ca. $+6.0^\circ$	
+1300 m	ca. $+7.8^\circ$	

Tab. 5. Gletscherschwund-Szenarien für die Walliser Alpen Verknüpfung zwischen den Angaben zur erwarteten Klimaänderung (Temperaturangaben gemäss IPCC-Szenario A) und den hier verwendeten GWL-Szenarien.

Trotz aller hier erwähnten methodischen Unsicherheiten und Fehlerbandbreiten der Vorhersage wird nun für die Beurteilung der gletschergeschichtlichen Zukunft doch immerhin folgende Tatsache evident: Falls die in dieser Studie definierten Schneegrenzanstiegs-Szenarien tatsächlich eintreten, werden die Gletscher im Mattertal wesentlich schneller zurückgehen als dies im historischen Vergleichszeitraum «1850» bis «1973» der Fall war. Bereits in ca. 25 Jahren (GWL-Szenarien zwischen +100 m und +200 m) werden absolut betrachtet bereits ähnlich grosse Flächenareale (zwischen 24 und 51 km²) eisfrei werden wie in der gesamten bisherigen, rund 125 Jahre umfassenden Schwundperiode seit Mitte des letzten Jahrhunderts (rund 33.4 km²).

Aus diesem Blickwinkel muss der in den nächsten Jahrzehnten aufgrund der «heissen» Klimaprognosen zu erwartende Rückgang der Vergletscherung als sehr gravierend beurteilt werden. Die hier vorgestellten «hypothetischen» Szenario-Modellierungen bringen damit eine ausserordentlich grosse Sensibilität und Anfälligkeit der heutigen Vergletscherungssituation gegenüber künftigen Klimaänderungen zum Vorschein. Dieser Befund bestätigt und unterstreicht einmal mehr die wichtige «Zeigerfunktion» alpiner Gletscher in klimadiagnostischer Hinsicht.

Dank

Der vorliegende Beitrag entstand im Rahmen des NFP 31-Teilprojektes «Die Auswirkung von Klimaänderungen auf die Gletscher und deren Vorfelder – Gletscherschwund-Szenarien», welches in verdankenswerter Weise durch den Schweizerischen Nationalfonds unterstützt wurde (Projekt Nr: 4031-033412). Stud. geogr. Carmen Treuthardt (Zürich) und Dr. Pierre Kunz (Genf, NFP 31-Programmleitung) waren uns freundlicherweise bei der Übersetzung der Zusammenfassung ins Französische behilflich.

ZUSAMMENFASSUNG

Gletscher und Gletscherschwund im Mattertal (Südliche Walliser Alpen, VS)

Im Rahmen eines Teilprojektes des Nationalen Forschungsprogrammes 31 («Klimaänderungen und Naturkatastrophen») wurde im Gebiet des Mattertals (Kt. Valais) die Vergletscherung der Hochstandsausdehnung von 1850 vollständig rekonstruiert und mit der aktuellen, im Schweizerischen Gletscherinventar der ETH Zürich dokumentierten Situation (Bezugsjahr 1973) verglichen. Im Beobachtungszeitraum seit 1850 hat sich die Gesamtvergletscherung von ursprünglich 200.6 km² um 33.4 km² auf 167.2 km² verringert. Der regionale Flächenschwundanteil von 16.7 % ist im schweizerischen Vergleich jedoch als unterdurchschnittlich zu bezeichnen (z. B. Bündnerland rund 40 %), kann jedoch gut durch den Faktor «Gletschergrösse», bzw. «Vergletscherungsgrad» erklärt werden. Das absolute Ausmass des Flächenrückgangs verhält sich direkt, das relative umgekehrt proportional zu den 1850er-Ausgangsdimensionen: kleine Gletscher haben prozentual die grössten Einbussen erlitten.

Die mittlere Lage der Gleichgewichtslinie (oder Gletscher-Schneegrenze) wurde einheitlich mit der Flächenteilungsmethode bestimmt, welcher ein konstantes Verhältnis zwischen Nähr- (Sc) zu Zehrgebiet (Sa) von 2:1 zugrunde gelegt wurde. Sie befindet sich gesamtregional auf 3085 m ü. M., eine der höchsten Lagen im Schweizer Alpenraum. Räumlich und klimageographisch betrachtet zeichnen die Schneegrenzwerte in beiden Bezugsjahren eine vom feuchteren westlichen Wallis (Regionen Tour Sallière, Aiguille d' Argentières) in Richtung des trockeneren Dent Blanche- und Monte Rosa-Gebietes markant ansteigende, weiter gegen Osten in Richtung der Regionen Monte Leone und Blinnenhorn spürbar absinkende Struktur nach. Diesem Trendverhalten der Schneegrenzhöhen liegt hauptsächlich das unterschiedliche Niederschlagsangebot und dessen Einfluss auf den Faktor Akkumulation zugrunde.

Die schrittweise Modellierung verschiedener Schneegrenzanstiegs-Szenarien und deren Folgewirkungen auf die heutige Vergletscherung führt zur Einschätzung, dass selbst die überdurchschnittlich grossen Gletscher im Mattertal in den kommenden Jahrzehnten wesentlich markanter zurückgehen werden als im Beobachtungszeitraum 1850-1973. Diese Einschätzung unterstreicht auch aus gletscherkundlicher Sicht die zunehmende Sensibilität der glazial und periglazial geprägten Hochgebirgslandschaften im Zuge der prognostizierten Klimaentwicklung.

Literaturverzeichnis

- ABEGG, B., U. KÖNIG, und M. MAISCH, 1994: Klimaänderung und Gletschertourismus. Geogr. Helvetica, Nr. 3, 103-114.
- AELLEN, M., 1986: Das Beobachtungsnetz der Gletscherkommission. In: KASSER, P., AELLEN, M. und H. SIEGENTHALER, 1986: Die Gletscher der Schweizer Alpen 1977/78 und 1978/79. Jubiläumsband 99. und 100. Bericht. Glaziologisches Jahrbuch der Gletscherkommission der Schweiz. Natf. Ges., VAW-ETH Zürich, S. 239-288.
- AELLEN, 1995: Jährlich erfasste Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen. In: Gletscher im ständigen Wandel. Jubiläums-Symposium der Schweiz. Gletscherkommission 1993 Verbier (VS) «100 Jahre Gletscherkommission - 100'000 Jahre Gletschergeschichte. Publ. der SANW. vdf, Hochschulverlag, ETH Zürich, S. 123-146.
- ANNALEN der Schweiz. Meteorolog. (Zentral-)Anstalt: Jahrgänge 1979, 1980, 1991, Zürich.
- ATLAS DER SCHWEIZ, 1967: Blatt 12, Klima und Wetter II: Niederschlag. Verlag der Eidgenössischen Landestopographie, Wabern-Bern.
- BATTAGLIA, J., 1994: Die Gletscherveränderungen im «Grossraum Gotthard» (Hochstand 1850 - Ausdehnung heute- Gletscherschwund-Szenarien). Unveröff. Diplomarbeit Geogr. Institut der Univ. Zürich, 167 S.
- BENZ, Ch., 1995: Die Gletscher des Unterwallis (Hochstand 1850 - Ausdehnung heute - Schwundszennarien). Unveröff. Diplomarbeit Geogr. Institut der Univ. Zürich.
- BOHNENBLUST, S., 1988: Gletschergeschichtliche Untersuchungen und dendrochronologische Analysen an Lärchen (*Larix decidua* Mill.) im Val d'Hérens und im Raum Zermatt (VS) (Glacier d'Arolla, Glacier de Ferpècle und Zmuttgletscher). Unveröff. Diplomarbeit Geogr. Institut Univ. Zürich.
- DIE ALPEN: Zeitschrift des Schweizer Alpen Clubs S.A.C., versch. Jahrgänge, Bern.
- GROSS, G., 1987: Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850-1920-1969. Zeitschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Heft 2, 131-141.
- HAEBERLI, W., 1990: Permafrost. In: VAW, 1990: Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Internat. Fachtagung, 11. Mai 1990 in Zürich, Mittlg. VAW-ETH Zürich, Nr. 108, 71-88.
- 1991: Alpengletscher im Treibhaus der Erde. Regio Basiliensis, 32/2, 59-72.
- 1992: Eisstürze und Murgänge im Hochgebirge. Vorstudie im Auftrag der Expertengruppe des NFP 31. Schlussbericht. VAW-ETH Zürich, Bericht Nr. 97.5, 30 S.
- HOLZHAUSER, H., 1985: Neue Ergebnisse zur Gletscher- und Klimageschichte des Spätmittelalters und der Neuzeit. Geographica Helvetica, Nr. 4, 168-185.
- 1995: Gletscherschwankungen innerhalb der letzten 3200 Jahre am Beispiel des Grossen Aletsch- und des Gornergletschers. Neue Ergebnisse. In: Gletscher im ständigen Wandel. Jubiläums-Symposium der Schweiz. Gletscherkommission 1993 Verbier (VS) «100 Jahre Gletscherkommission - 100'000 Jahre Gletschergeschichte. Publ. der SANW. vdf, Hochschulverlag, ETH Zürich, S. 101-122.
- HÖLZLE, M., 1994: Permafrost und Gletscher im Oberengadin. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren. Diss. ETH Nr. 10521, Mittlg. der VAW-ETH Zürich, Nr. 132, 130 S.
- HYDROL. JAHRBUCH DER SCHWEIZ, 1992: Hrsg. von der Landeshydrologie und -geologie. Eidg. Dept. des Innern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 385 S.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change), 1990: Climate Change. The IPCC Scientific Assessment of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, XXXIX, 364 p.
- JUNG, G., 1990: Seen werden, Seen vergehen. Entstehung, Geologie, Geomorphologie, Altersfrage, Limnologie und Ökologie. Ott Verlag Thun, 207 S.
- KUHN, M., 1990: Energieaustausch Atmosphäre-Schnee und Eis. In: VAW, 1990: Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Internat. Fachtagung, 11. Mai 1990 in Zürich, Mittlg. VAW-ETH Zürich, Nr. 108, 21-32.
- LIEB, G. K., 1993: Zur quantitativen Erfassung des Rückganges der Kärntner Gletscher vom Hochstand um 1850 bis 1969. Arb. Geogr. Inst. Graz, Bd. 31, 231-251, Graz 1992/93.
- KASSER, P., M. AELLEN und H. SIEGENTHALER 1986: Die Gletscher der Schweizer Alpen 1977/78 und 1978/79. Jubiläumsband 99. und 100. Bericht. Glaziologisches Jahrbuch der Gletscherkommission der Schweiz. Natf. Ges., VAW-ETH Zürich, 288 S.
- MAISCH, M., 1992: Die Gletscher Graubündens. Rekonstruktion und Auswertung der Gletscher und deren Veränderungen seit dem Hochstand von 1850 im Gebiet der östlichen Schweizer Alpen (Bündnerland und angrenzende Regionen). Teil A: Grundlagen-Analysen-Ergebnisse (320 S.); Teil B: Verzeichnisse-Datenkataloge-Gletscherkarten (120 S.). Phys. Geographie, Vol. 33, Geogr. Institut der Univ. Zürich.
- 1995: Gletscherschwundphasen im Zeitraum des ausgehenden Spätglazials (Egesen-Stadium) und seit dem Hochstand von 1850 sowie Prognosen zum künftigen Eisrückgang in den Alpen. In: Gletscher im ständigen Wandel. Jubiläums-Symposium der Schweiz. Gletscherkommission 1993 Verbier (VS) «100 Jahre Gletscherkommission - 100'000 Jahre Gletschergeschichte. Publ. der SANW. vdf, Hochschulverlag, ETH Zürich, S. 81-100.
- MAISCH, M., A. WIPF, B. DENNELER, J. BATTAGLIA und Ch. BENZ (in Vorb.): Die Gletscher der Schweizer Alpen (Hochstand 1850 - Ausdehnung Heute - Gletscherschwund-Szenarien 21. Jhdt.). Schlussbericht NFP 31, vdf, Hochschulverlag, Zürich.
- MÜLLER, F., T. CAFLISCH und G. MÜLLER 1976: Firn und Eis der Schweizer Alpen, Gletscherinventar. ETH Zürich, Publ. Nr. 57 und 57a.
- PATZELT, G. und M. AELLEN, 1990: Gletscher. In: VAW, 1990: Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Internat. Fachtagung, 11. Mai 1990 in Zürich, Mittlg. VAW-ETH Zürich, Nr. 108, 49-70.
- RÖTHLISBERGER, F., 1976: Gletscher- und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla. Diss. Geogr. Inst. Univ. Zürich.
- SCHÜEPP, M., 1960: Lufttemperatur, 1. Teil. Klimatologie der Schweiz. Teil C. Herausgegeben von der Schweiz. Meteorolog. Zentralanst., Zürich.
- SCHÜEPP, M., M. BOUET, M. BIDER, und Ch. URFER, 1978: Regionale Klimabeschreibungen, 1. Teil: Gesamtübersicht, Westschweiz, Wallis, Juranordfuss sowie Mittelland. Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteorolog. Zentralanst., Jg. 1977.
- SOMMER, I., 1988: Gletschergeschichtliche Untersuchungen und dendrochronologische Analysen an Lärchen (*Larix decidua* Mill.) im Val Ferret und im Raum Zermatt. Unveröff. Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Zürich.
- UTTINGER, H., 1965: Niederschlag, 1.-3. Teil. Klimatologie der Schweiz. Teil E. Herausgegeben von der Schweiz. Meteorolog. Zentralanstalt, Zürich.
- UTTINGER, H., 1966: Niederschlag, 4. Teil. Klimatologie der Schweiz. Teil E. Herausgegeben von der Schweiz. Meteorolog. Zentralanstalt, Zürich.

- VAW, 1990: Schnee, Eis und Wasser in einer wärmeren Atmosphäre. Internat. Fachtagung, 11. Mai 1990 in Zürich, Mittlg. VAW-ETH Zürich, Nr. 108, 125 S
- WIPF, A. (in Vorb.): Gletscher und Gletscherschwund in den Berner und nördlichen Walliser Alpen. Diss. Geogr. Inst. Univ. Zürich.